

MATLAB EXPO 2023
2023/05/31

有機膜形成装置の 温度制御における Model-Based Design適用事例

■発表者
芝浦メカトロニクス株式会社
技術本部 研究開発グループ
杉内 佑輔

- 会社紹介
- 導入背景と課題
- 温度制御におけるモデルベース開発適用事例
- 開発実施結果とまとめ

- 会社紹介
- 導入背景と課題
- 温度制御におけるモデルベース開発適用事例
- 開発実施結果とまとめ

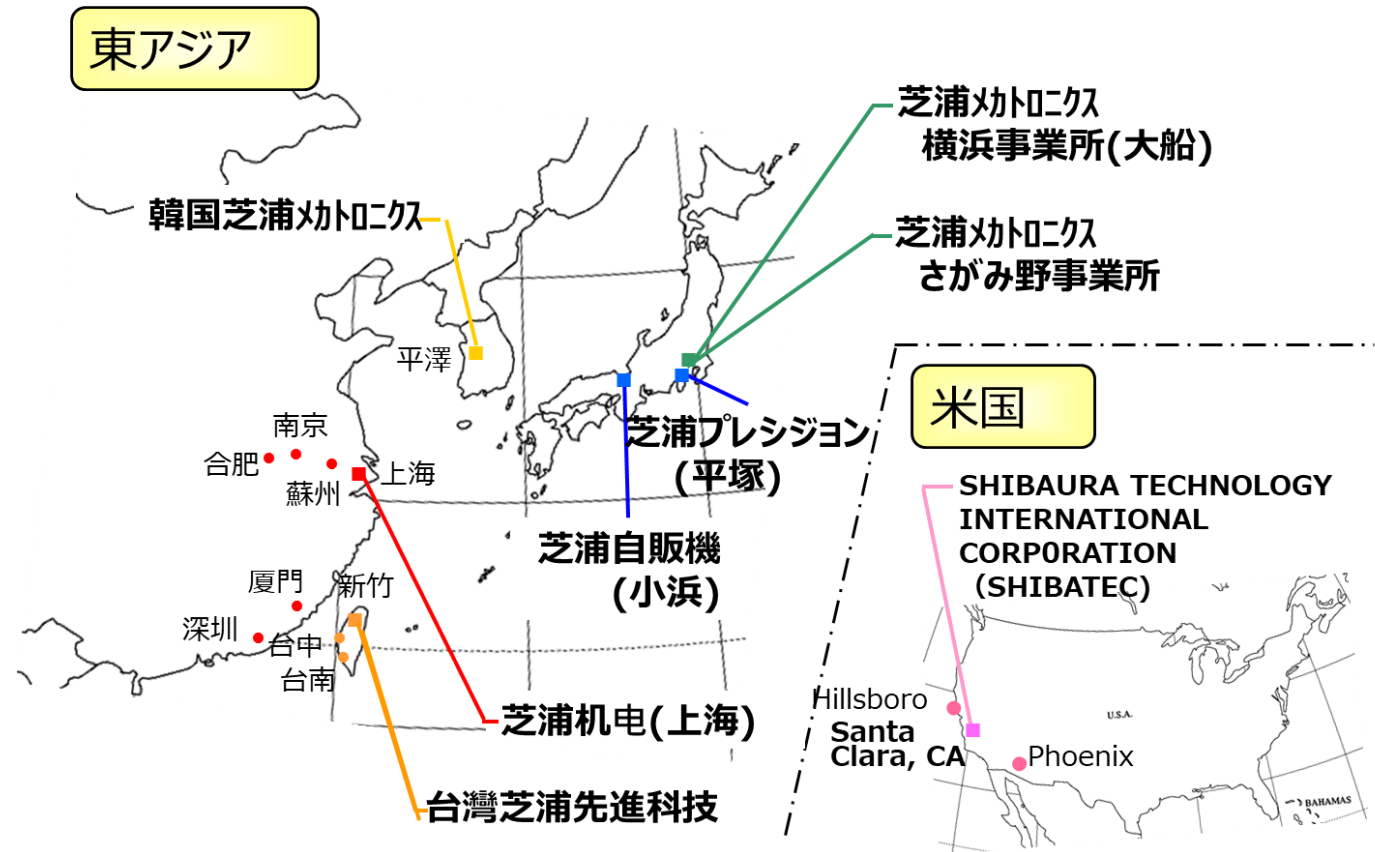
会社概要



- 商号 : 芝浦メカトロニクス株式会社
- 設立 : 1939年(昭和14年)10月12日
- 本社 : 神奈川県横浜市栄区
- 資本金 : 67億円(2023年3月末時点)
- 売上高 : 連結610億円(2022年度)
- 営業利益 : 連結109億円(2022年度)
- 従業員 : 連結1,221名(2023年3月末時点)

Smart Solutions & Services for Your Manufacturing

国内・海外拠点



ファインメカトロニクス事業部

- 半導体製造装置（前工程）
 - ・ウェーハ洗浄／エッチング装置
 - ・マスク洗浄／エッチング装置
- F P D 製造装置（前工程）
 - ・ウェットプロセス装置
 - ・インクジェット装置

横浜事業所（本社）



メカトロニクスシステム事業部

- 半導体製造装置（後工程）
 - ・ダイボンダ
 - ・フリップチップボンダ
- F P D 製造装置（後工程）
 - ・アウターリードボンダ
- 真空応用装置

さがみ野事業所

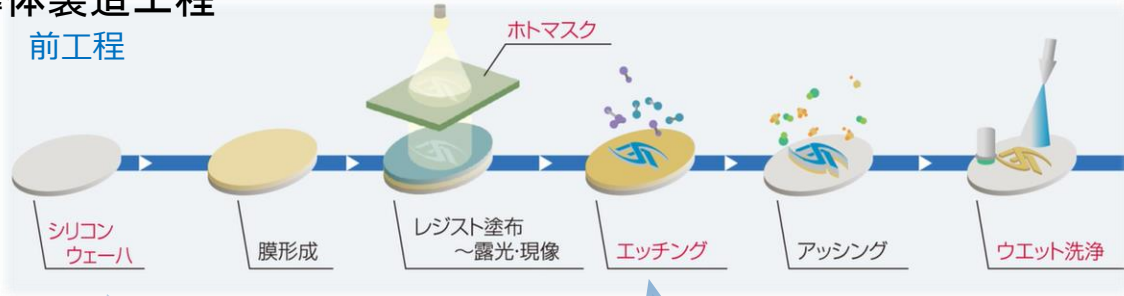




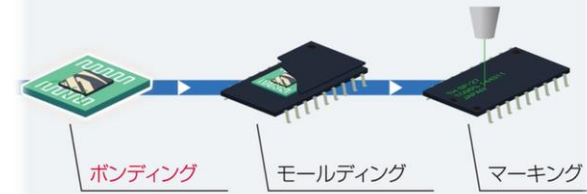
超高精度
ハイブリッドボンダ



半導体製造工程
前工程



後工程



主要製品群 (真空応用)



CCS-1300/2100/2800
用途：カバーガラス (AR)
ヘッドアップディスプレイ (AR、増反射) 等



stella (枚葉式)
用途：CD、DVD、BD等



BM-600/650 (枚葉式)
用途：車載/親水ミラー等



BM-700 (枚葉式)
用途：エンブレム、内装品等



CFS-36PC
用途：自動車外装 (バンパー、ランプリフレクタ等)
自動車内装 (メータリング、装飾品等)



プラコートIV (枚葉式)

自動車産業

光学産業

電子産業

情報産業

真空技術

半導体産業

研究開発
その他産業



CFS-12P-90H
用途：LED、電子部品



!-Miller
用途：電子部品、LED、バイオ、
材料等の研究開発



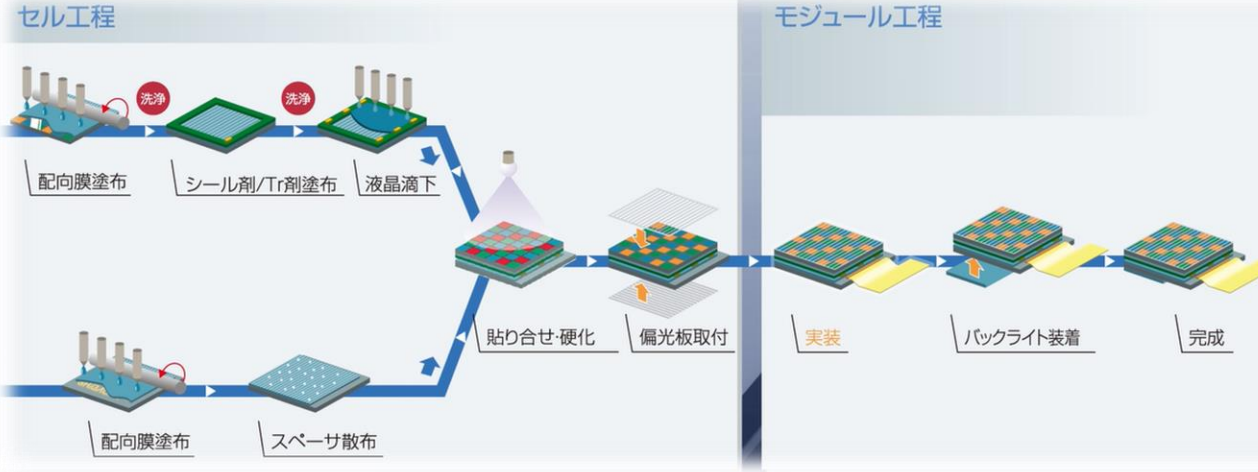
SWN-5000
用途：パワーデバイス、LED



BM-1400E (枚葉式)
用途：電子部品

SHIBAURA 主要製品群 (フラットパネルディスプレイ関連) 他

ディスプレイ製造工程



前工程向け製品群
(ウェット工程)



後工程向け製品群
(アウターリードボンダ)



フレキシブルOLED向け真空焼成炉

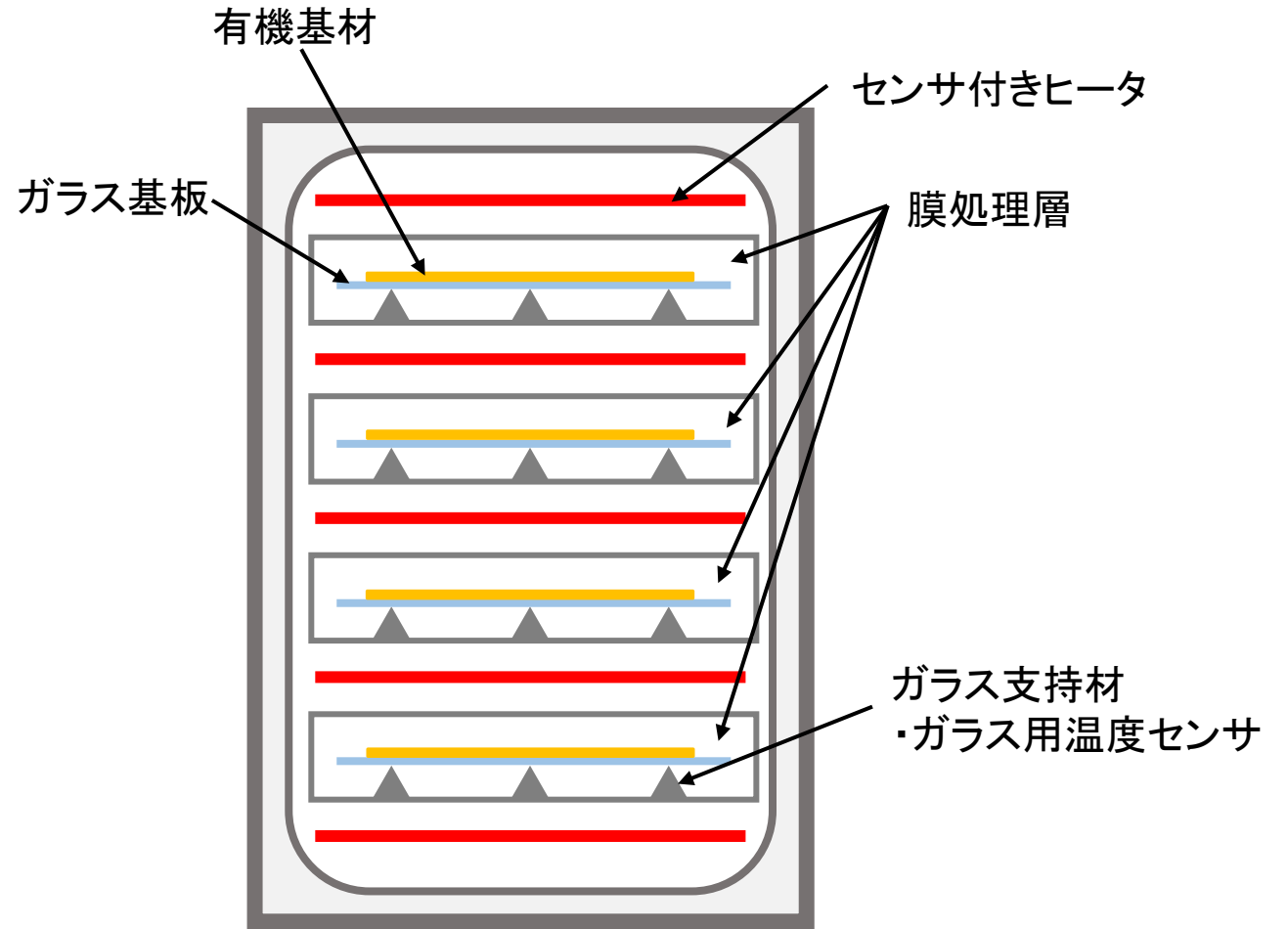
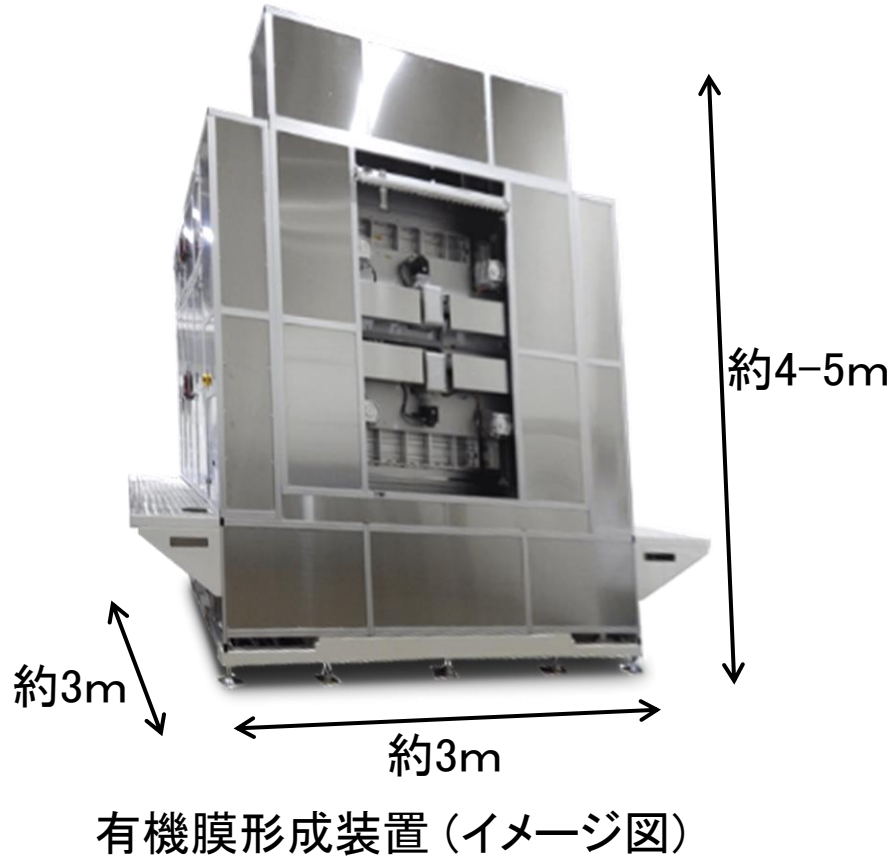


インクジェット銀剤印刷装置

- 会社紹介
- 導入背景と課題
- 温度制御におけるモデルベース開発適用事例
- 開発実施結果とまとめ

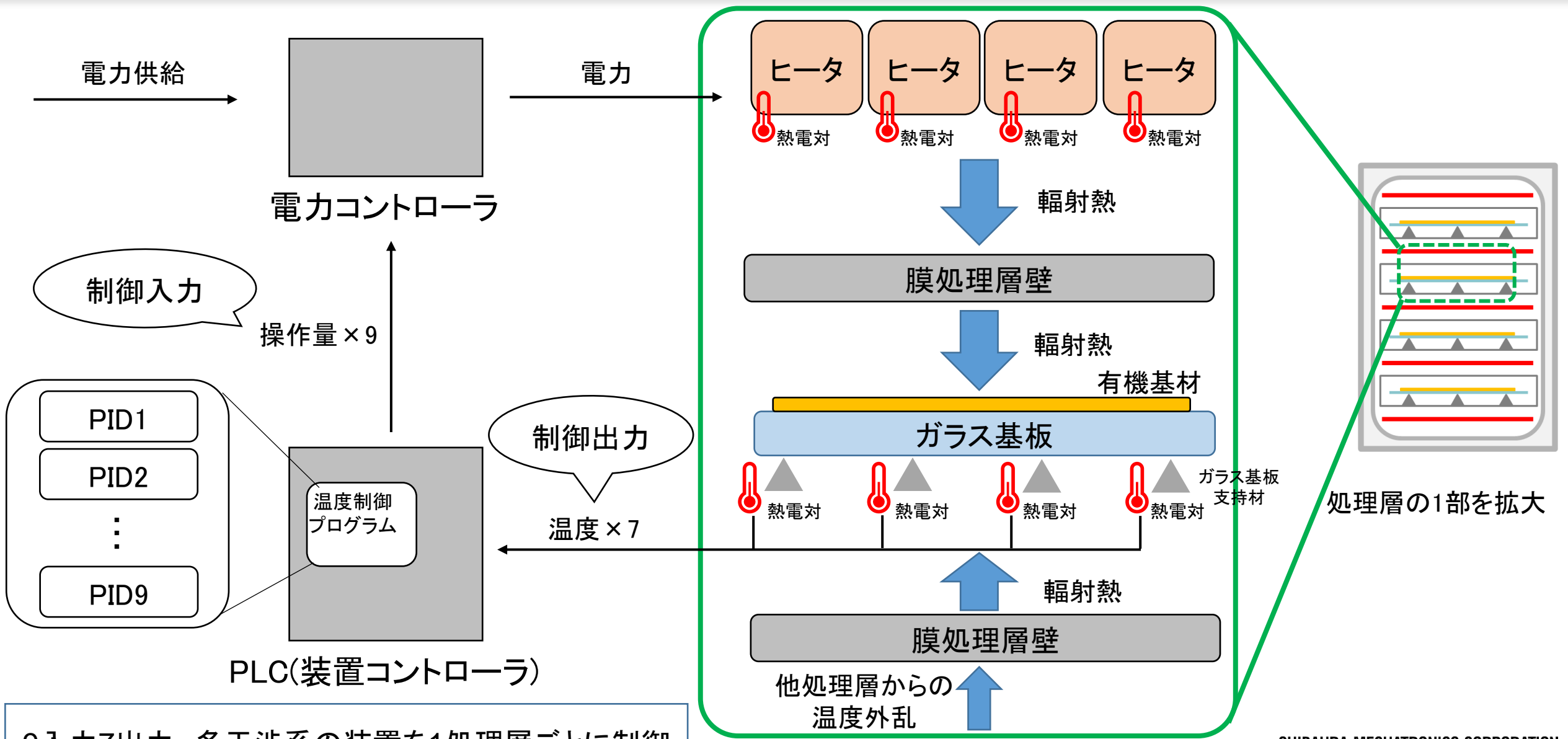
有機膜形成装置の概要

有機ELディスプレイ基材を作製する加熱炉



有機膜形成装置 内部模式図

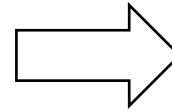
有機膜形成装置の温度制御方式



9入力7出力、多干渉系の装置を1処理層ごとに制御

○ 制御設計の課題 (What to Do)

- ▶ パラメータ調整の時間を短くする
- ▶ 調整ルールを単純にする
- ▶ 実機を使わずに調整する



- 手戻りを少なく
- 設計時間を短縮

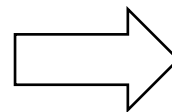
○ 制御設計の施策

シミュレーションを使った
スマートな開発
⇒ **モデルベース開発**

※ モデルベース開発 (Model-Based Design)

○ 装置の制御上の課題 (What to Do)

- ▶ オーバーシュートさせない制御
- ▶ 対象の伝熱特性を考慮した制御
- ▶ 多入力多出力が扱える制御



- より高度な制御方式の適用

○ 装置制御の施策

現代制御理論の導入
⇒ **モデル予測制御**

○ モデルベース開発とは

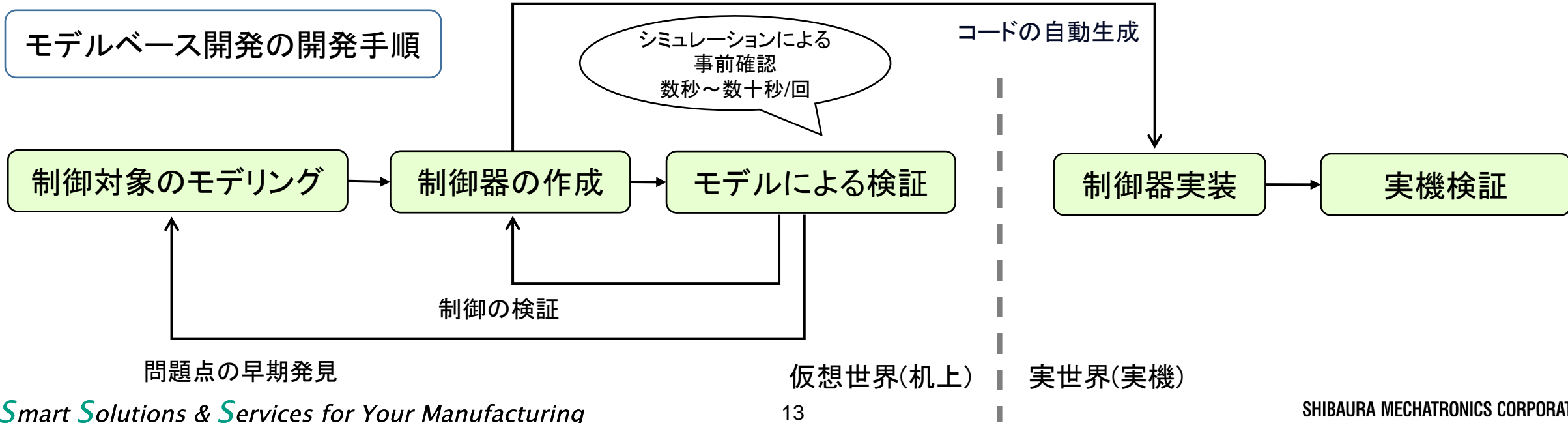
制御器や制御対象のシミュレーションモデルを作成し、机上で検証を行いながら開発を進めていく手法

[モデルベース開発の利点]

- ・ 机上で制御の検証
- ・ 問題点の早期発見により、開発手戻りの削減
- ・ コードの自動生成が利用可能

自動車業界以外でも導入事例が多数

⇒ 効率のよい開発ができると注目

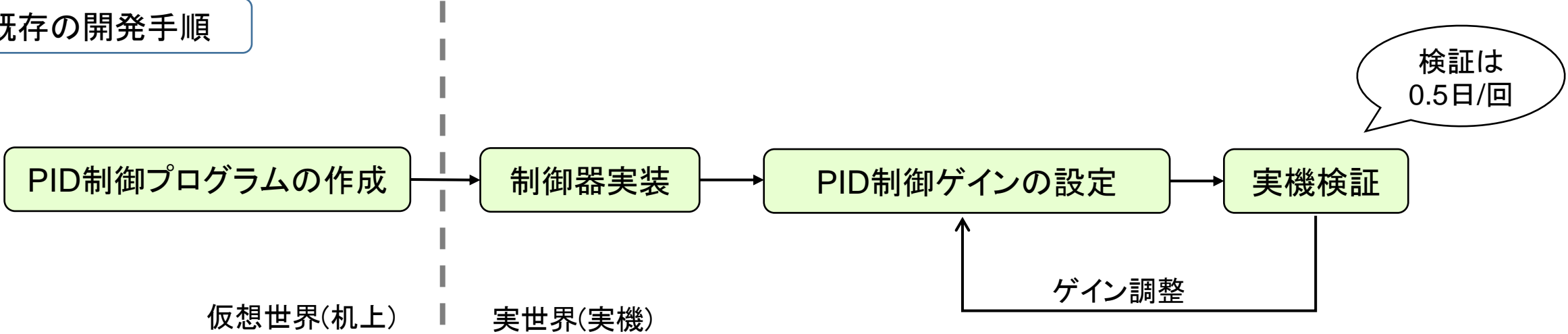


- 制御系設計の簡易化**
 - 理論に基づいた制御設計
 - モデルを用いた認識の共有
- 調整ルールの単純化**
 - “職人技”からの脱却
 - パラメータ調整時間の短縮
- 省エネ省労力**
 - シミュレーションを使用した設計
 - 使用電力/設計工数の削減

現代制御も導入してより高度に制御をしたい

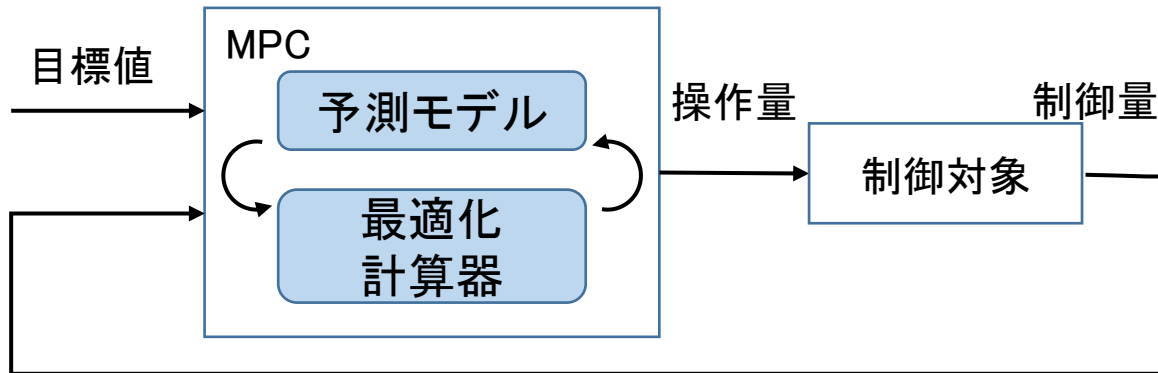
⇒ モデル予測制御を導入

既存の開発手順



○ MPC とは

制御対象の未来の動きを「予測」し、
計算による「最適な」操作にて制御する手法



[MPCの利点]

- 目標値を先読みし、有限時間先までの動作を予測 (Look-Ahead機能、MPC内部の予測モデルを利用)
- 大規模かつ複雑な対象に対応 (制御対象モデルに基づく合理的な制御)
- 制約条件を守った制御 (リアルタイムの最適化計算)

⇒ 高性能かつ信頼性のある制御

最適化評価関数

$$J = \Sigma w_y \times (\text{追従誤差})^2 + \Sigma w_{\Delta u} \times (\text{操作量の変化率})^2 + \Sigma w_u \times (\text{操作量の大きさ})^2$$

どれを重要視するかで重み(w)の値を調整可

制約条件を考慮して最適化が可能

ただし、

$$\begin{aligned} \text{下限値} &\leq \text{制御量} \leq \text{上限値} \\ \text{下限値} &\leq \text{操作量変化率} \leq \text{上限値} \\ \text{下限値} &\leq \text{操作量} \leq \text{上限値} \end{aligned}$$

MPCに期待するメリット

多入力多出力が扱える

- 温度の多干渉性を考慮した制御
- 制御器の削減

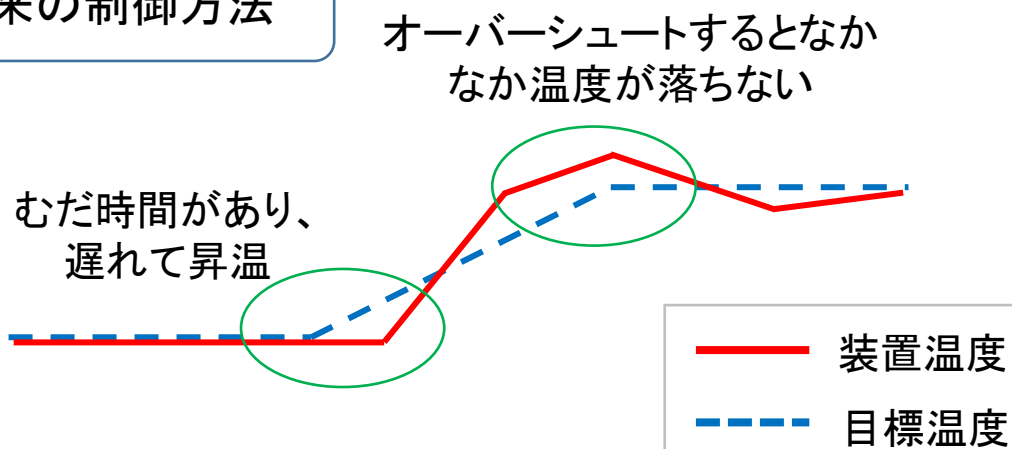
目標値の先読み

- 目標値先読み機能(Look-Ahead)の活用
- フィードフォワード制御による追従性の向上

制約の順守

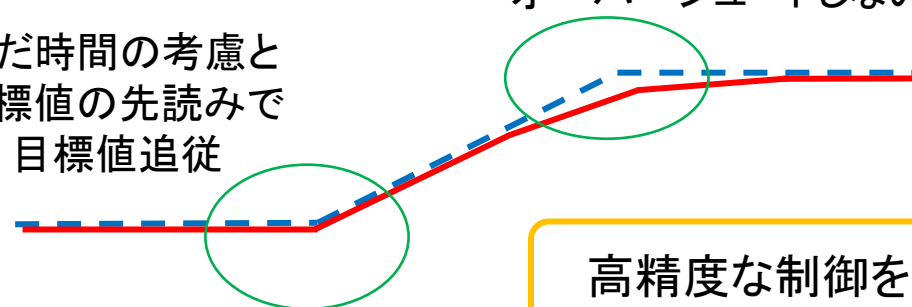
- ハードウェア制約の範囲内で制御可能
- PIDゲインのようなパラメータ調整が不要

従来の制御方法

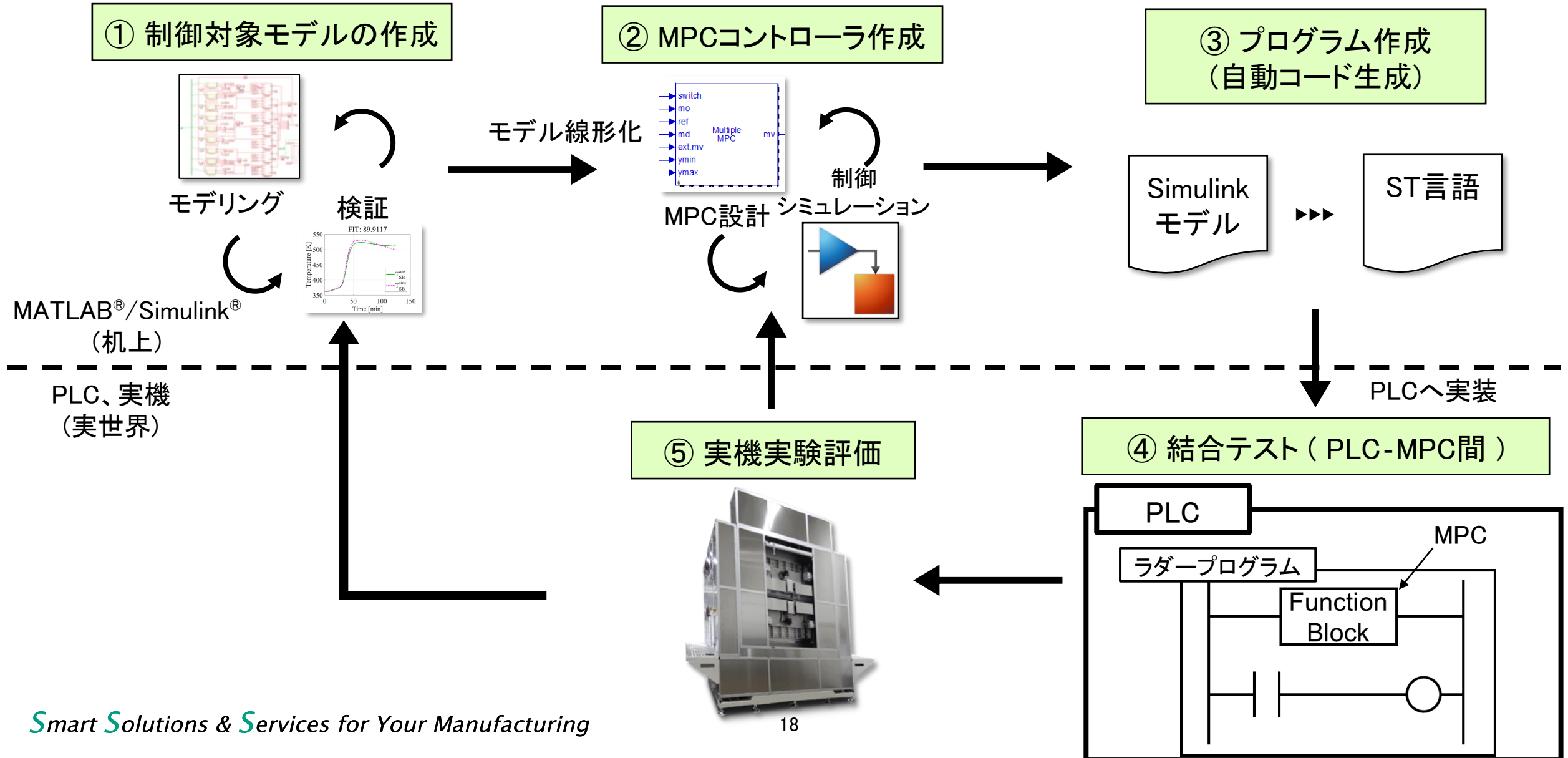


MPCを導入した制御方法

むだ時間の考慮と目標値の先読みで目標値追従

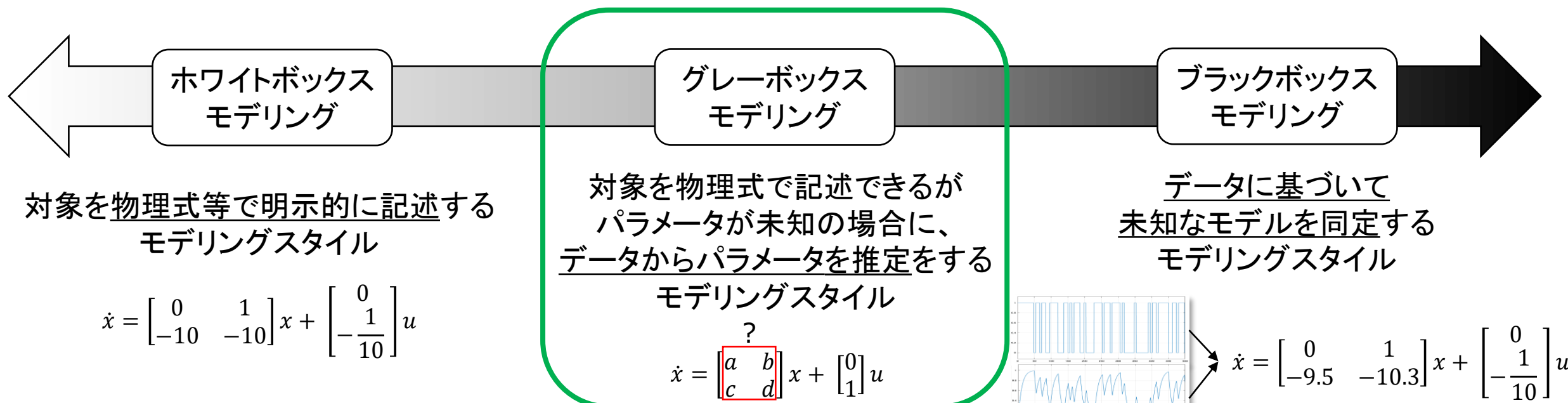


- 会社紹介
- 導入背景と課題
- 温度制御におけるモデルベース開発適用事例
- 開発実施結果とまとめ



モデル作成では**グレーボックスモデリング**を採用

- ▶ モデルが直感的に理解しやすい
- ▶ 装置の構造が既知だが、未知のパラメータが存在
- ▶ 実機と同じ動きをする非線形なモデルを作成したい



グレーボックスモデリング : ① モデル構造作成

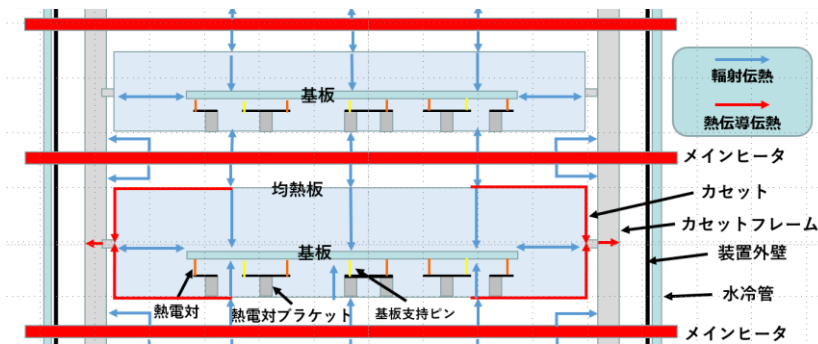
- ▶ 実機の構造からモデルを作成
- ▶ 制御対象は装置内の1層
→ 1層ごとにモデリング

実機を観察 (設計図面/目視)



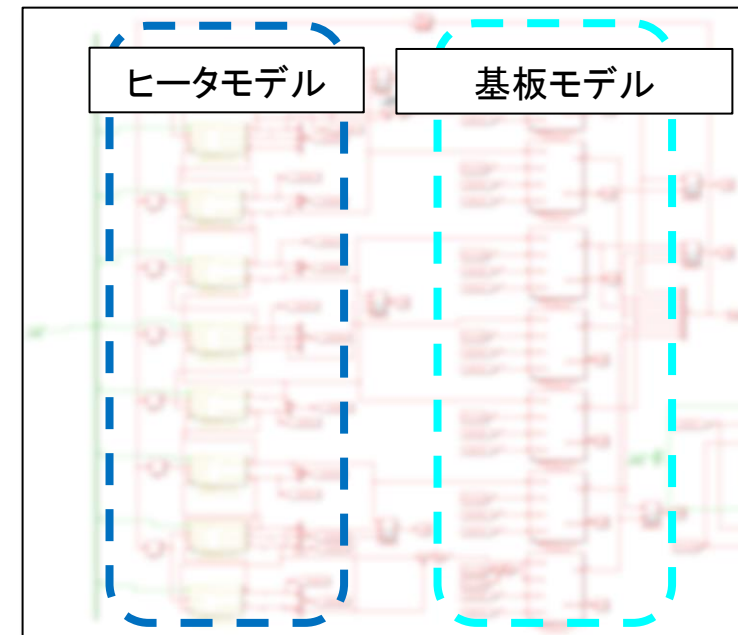
実機

- 伝熱経路を図示
- 伝熱式を立式



実機伝熱模式図

装置の要素ごとに伝熱式を記述
↓
Simulinkで結線、制御対象モデル作成



制御対象モデル

構造が同じパーツ(ヒータなど)は
ライブラリンクを使用して工数削減

グレーボックスモデリング：② パラメータ探索



伝熱式における未知のパラメータをリストアップ



輻射の
伝熱方程式

$$\text{熱流束}_{BA} = \text{物理定数} * \frac{(\text{温度}_B^4 - \text{温度}_A^4)}{\left(\frac{1}{\text{放射率}_B} + \frac{1}{\text{放射率}_A} - 1.0\right)}$$

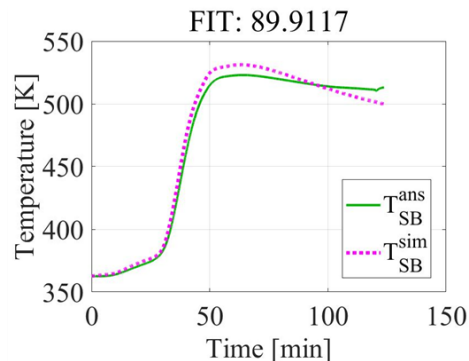
$$\text{温度変化量}_{BA} = \frac{\text{形態係数}_{BA} * \text{面積}_A * \text{熱流速}_{BA} * \text{制御周期}}{\text{熱容量}_A}$$

探索パラメータの一例
伝熱方程式中の放射率と形態係数は
事前調査では求められない

※ 高温・真空のため、放射率の測定が困難
※ 内部構造が複雑なため、形態係数の決定が困難



モデルの応答と実機の波形が一致するようなパラメータを探索

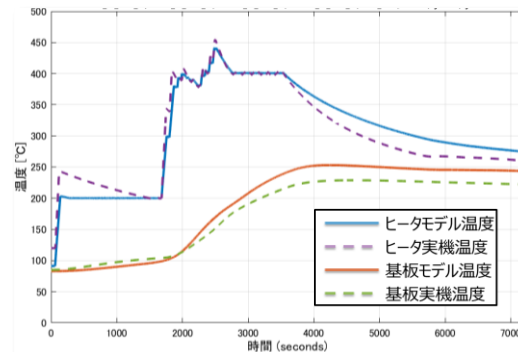


パラメータ同定結果

→ パラメータ探索には

- Optimization Toolbox™
- Global Optimization Toolbox

 を使用し、自動探索

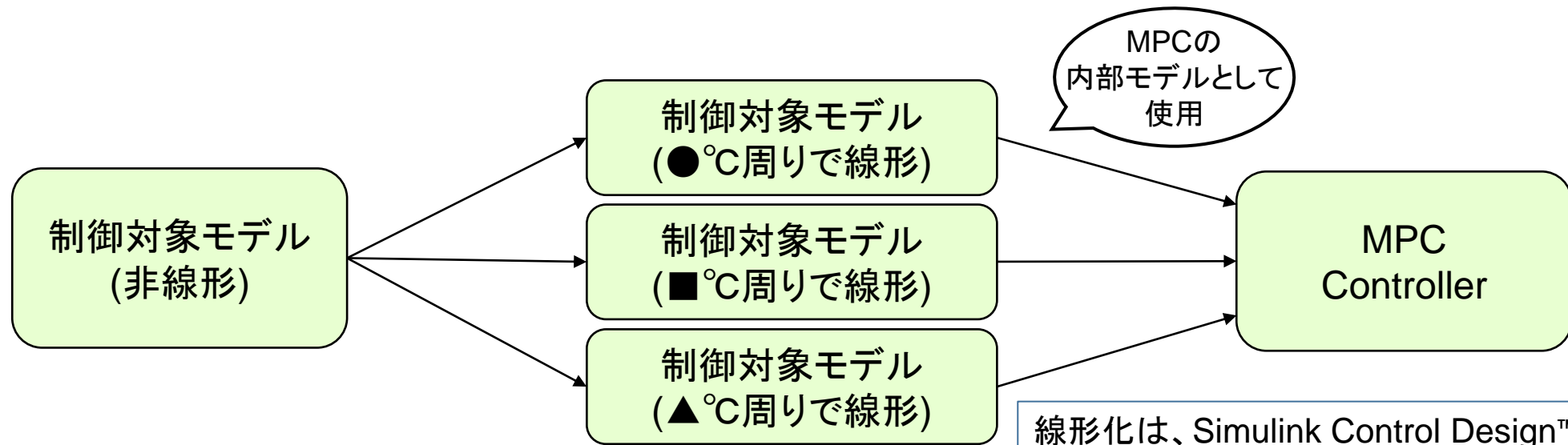


モデル検証

→ パラメータ探索の結果を用いたモデルと、
実機の動作結果を比較して
モデルの確からしさを検証した

MPCの内部モデルは **制御対象モデルを“線形化”** して作成

- ▶ 使用温度範囲が広く、温度帯によってダイナミクスが変化
- ▶ 非線形性が強いため、線形モデルを複数作成し、MPCへ適用
- ▶ シミュレーションを通じ、複数の代表的な温度点において線形化を実行



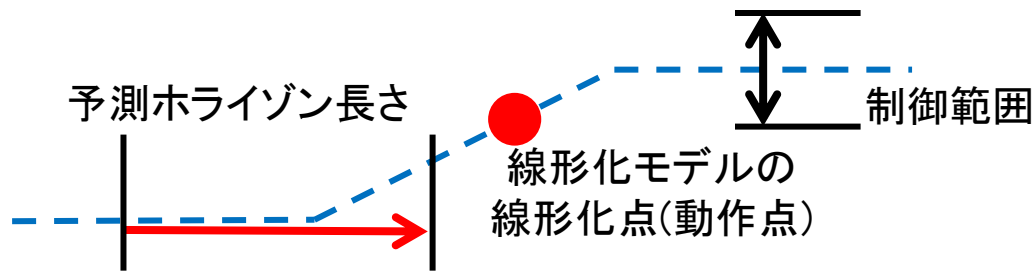
線形化は、Simulink Control Design™ の機能を使用

Multiple MPC にて有機膜形成装置の制御器を設計

Model Predictive Control Toolbox™を使用

※ Multiple MPC : 別名ゲインスケジューリングMPC
複数の線形MPCを切り替えて動作する

① 設計要件・制約条件を確認



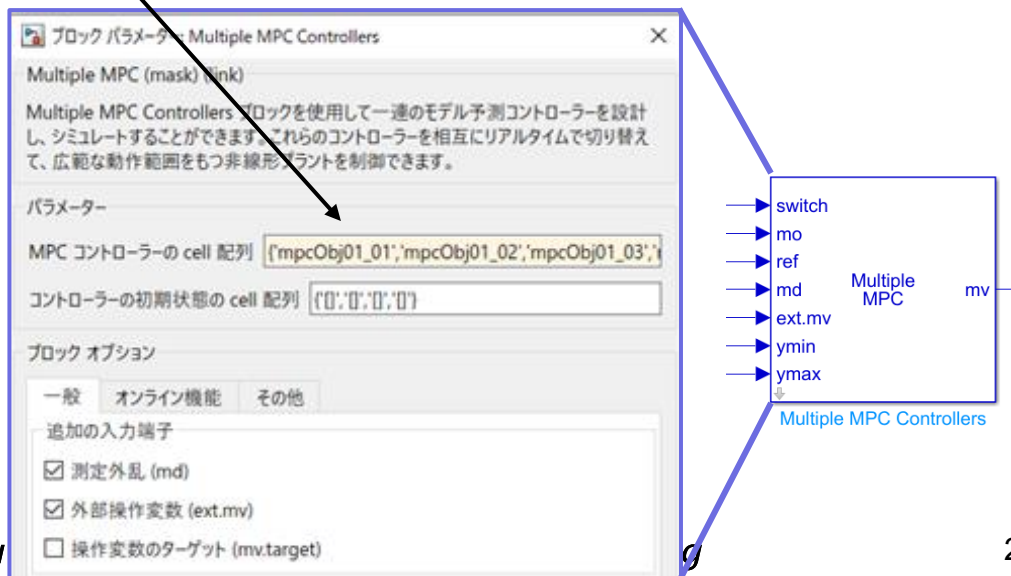
② 設計要件・制約条件に沿ったMPC設定をスクリプトベースで記述

```

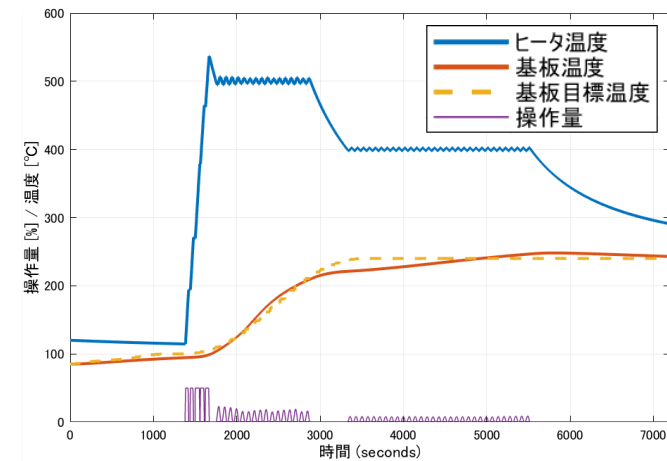
MPCオブジェクトへ設定を追記していく
% Make the MPC Object
mpcObj=mpc(Model,ts,predHriz,ctrlHriz);

%% specify nominal values for inputs and outputs
mpcObj.Model.Nominal.U = 100;
mpcObj.Model.Nominal.Y = 100;
    
```

③ 作成したMPCオブジェクトをSimulinkブロックの中へ記述



④ 動作をシミュレーションにて確認後、実装



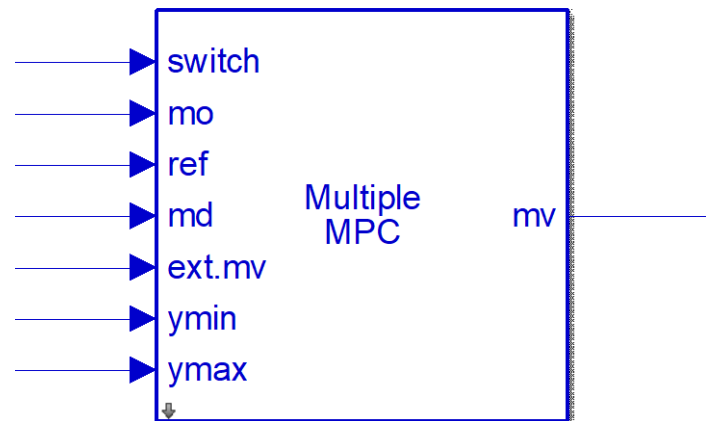
MPCのPLCへの実装はSimulink PLC Coder™ を使用

- ▶ 設計したMPCをST言語へ変換(自動生成)
- ▶ 装置制御回路(ラダー)へMPC適用が可能に

当社における
MATLAB/Simulink導入の
決め手の一つ

○ STEP1 MPCブロックのSTコード変換

- ▶ MPCブロックをサブシステム化後、Atomicサブシステムへ変換
- ▶ 使用するIDEに基づいてSTコードを吐出

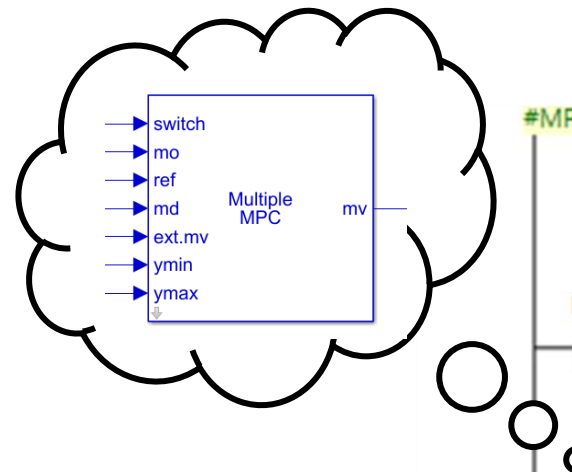
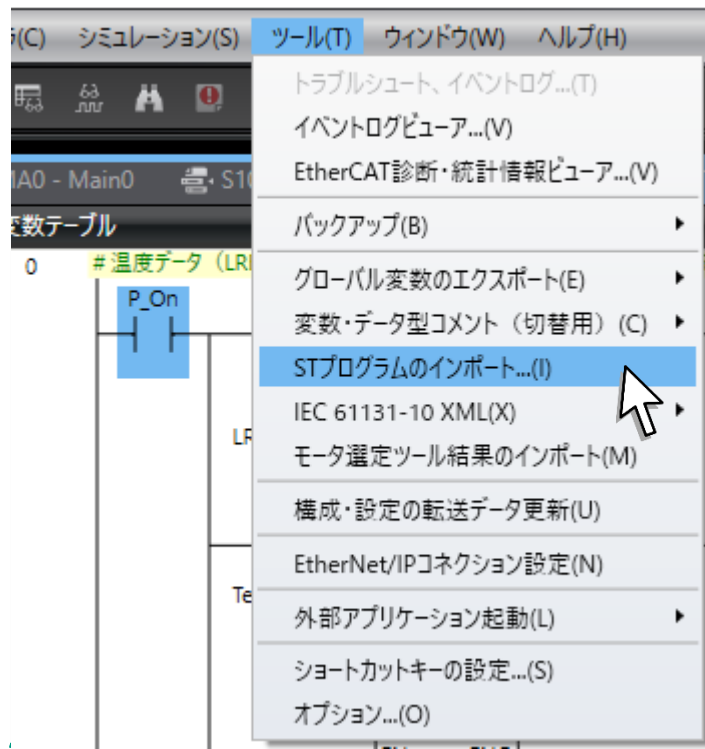


```

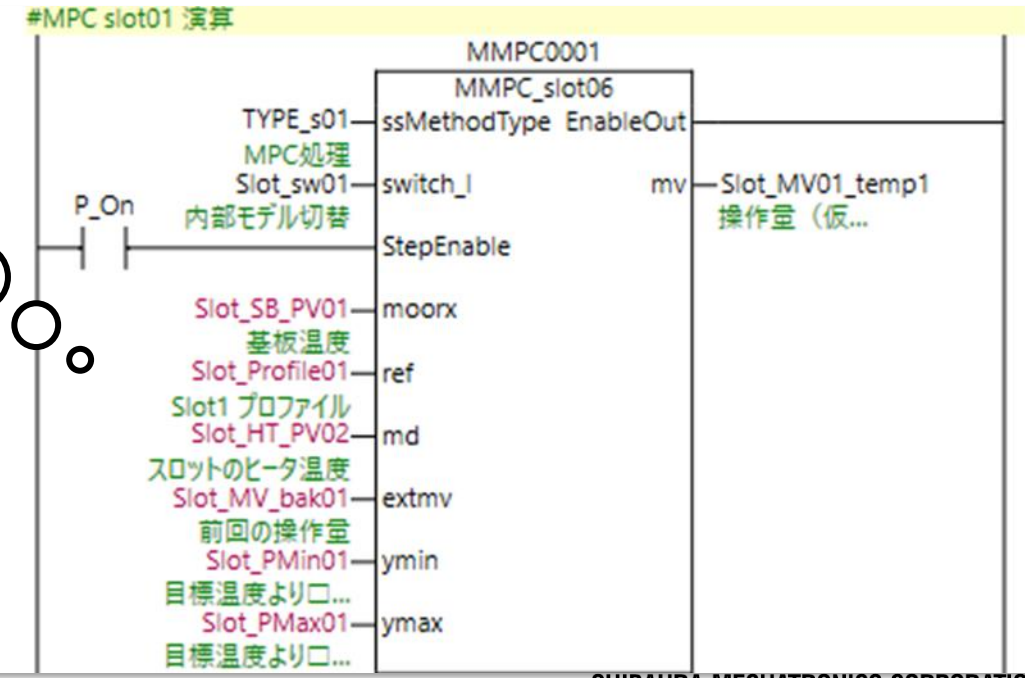
File: MPC_control.st
1  (*
2  *
3  * File: MPC_control.st
4  *
5  * IEC 61131-3 Structured text (ST) code generated for subsystem "MPC_control/MPC_Subsystem"
6  *
7  * Model name          : MPC_control
8  * Model version       : 1.1
9  * Model creator       :
10 * Model last modified by :
11 * Model last modified on : Fri Apr 14 16:44:37 2023
12 * Model sample time   : MPC_control/MPC_Subsystem
13 * Subsystem name      : MPC_control/MPC_Subsystem
14 * Subsystem sample time : 0.2s
15 * Simulink PLC Coder version : 3.5 (20221b) 14-May-2021
16 * Target Plugin version : 2.20
17 * ST code generated on  : Fri Apr 14 16:45:10 2023
18 *
19 * Target IDE selection  : OMRON Sysmac Studio
20 * Test Bench included  : No
21 *
22 *)
23
24 FUNCTION_BLOCK MPC_Subsystem
25 VAR_INPUT
26   mMethodType: SINT;
27   moorc: LREAL;
28   ref: LREAL;
29 END_VAR
30 VAR_OUTPUT
31   mv: LREAL;
32 END_VAR
33 VAR
34   Memory_PreviousInput: ARRAY [0..3] OF BOOL;
35   Last_PreviousInput: ARRAY [0..2] OF LREAL;
36   MathFunction2: LREAL;
37   MathFunction1: LREAL;
38   MathFunction: LREAL;
39   last_mv_UPDATE: LREAL;
40   e_a: ARRAY [0..3] OF SINT := SINT#-1,SINT#-1,SINT#-1,SINT#-1;
41   b_Min: ARRAY [0..3] OF SINT := SINT#100,SINT#100,SINT#0,SINT#0;
42   MPC_Subsystem_b_Kx: ARRAY [0..5] OF LREAL := LREAL#5,4697395818657615,LREAL#0,70921082851139211,
43   LREAL#418,81871473003008,LREAL#5,341801514770895,LREAL#0,69074045484870261,LREAL#407,77137297368924,
44   LREAL#0,2853058464217895,LREAL#-0,3483730460769084,LREAL#-0,3882253156489306,LREAL#-0,43912784438738422,
45   LREAL#-0,4827046872808573,LREAL#-0,5400817076962554,LREAL#-0,60789638011467958,LREAL#-0,669586951583431,
46   LREAL#-0,732762073495842,LREAL#-0,80045308728924438,LREAL#-0,86981953195262686,LREAL#-0,94121038508732355,
47   LREAL#-1,0151789780434622,LREAL#-1,0914771124704263,LREAL#-1,1700610448137079,LREAL#-1,250895470505866,
48   LREAL#-1,33389595482082,LREAL#-1,410811688393121,LREAL#-1,5063686244950879,LREAL#-1,597272242188795,
49   LREAL#-1,687107148090846,LREAL#-1,7804808145471673,LREAL#-1,8758042727697448,LREAL#-1,97303838911627,
50   LREAL#-2,072147178925583,LREAL#-2,17381916344663989,LREAL#-2,2758381171309263,LREAL#-2,3803446698574078,
51   LREAL#-3,4895222647896724,LREAL#-3,5945144411529314,LREAL#-3,7041107293824192,LREAL#-3,819227874145718,
52   LREAL#-4,938145962849147,LREAL#-4,104519319337144938,LREAL#-4,11624512603557640,LREAL#-4,12864767379276
  
```


○ STEP2 ラダーへ組み込み

- ▶ IDEのメニュータブ「ツール」→「STプログラムのインポート」にて生成したSTコードを読み込む
- ▶ ラダー内でSimulinkと同じ入出力を定義し、実装



作成したSTコードを
インポート

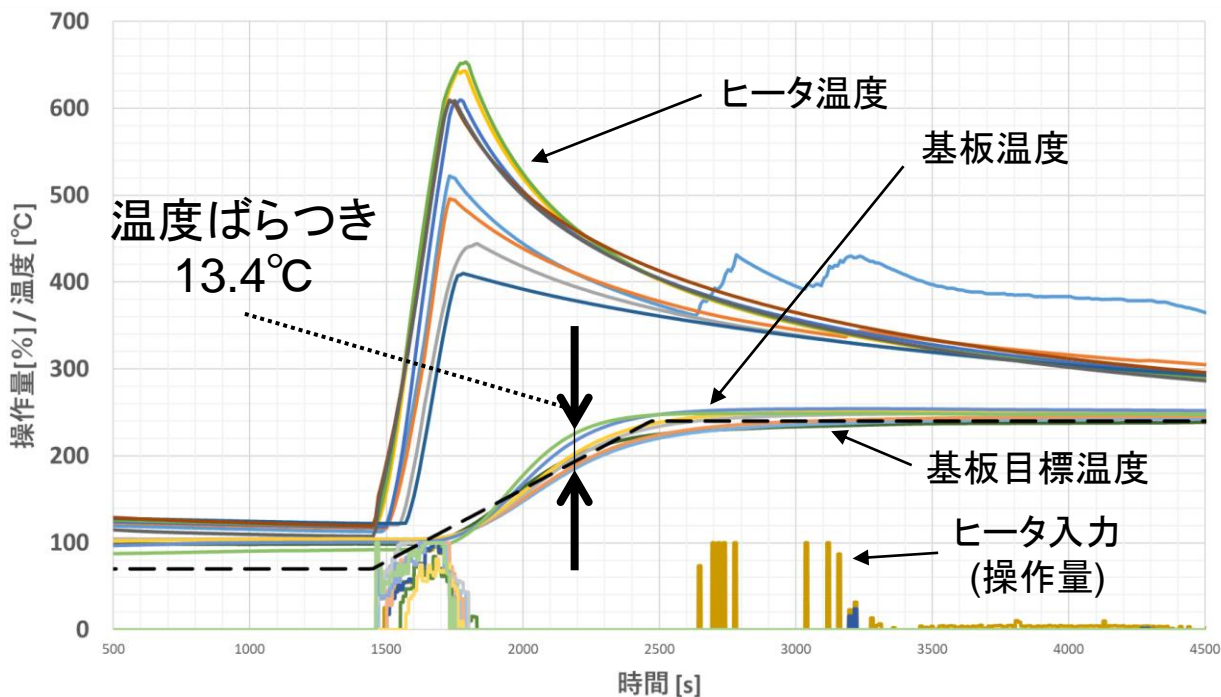


○ 以上の取り組みにより、温度制御開発を進行中

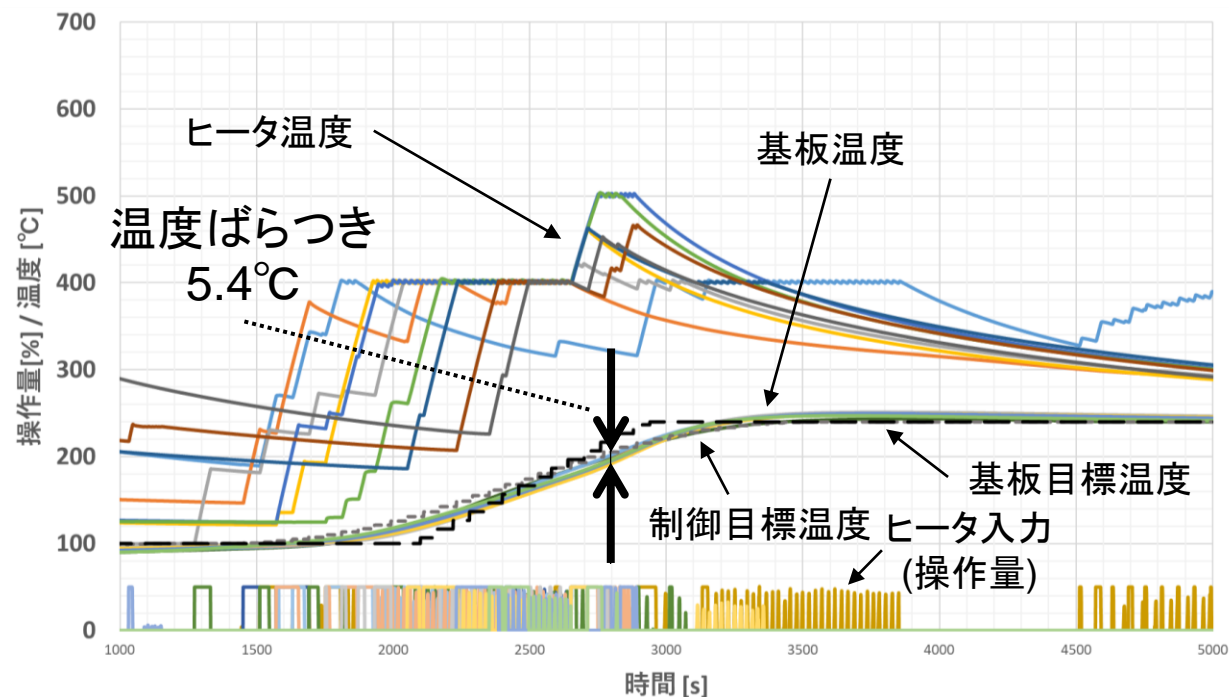
- ▶ 評価段階の結果(一部の処理層)のご紹介
- ▶ 目標の追従性向上・制御量ばらつき低下の効果が見られる

※ 開発中参考値

- 制御点面内ばらつき(標準偏差) 平均: 13.4°C \rightarrow 5.4°C
- 制御点追従誤差(MAPE)平均: 14.1% \rightarrow 3.4%



既存の制御手法 (調整途上値)



MPCによる制御手法

- 会社紹介
- 導入背景と課題
- 温度制御におけるモデルベース開発適用事例
- 開発実施結果とまとめ

○ モデルベース開発導入の良かった点/困難だった点

良かった点

- ▶ 実機レスで制御設計ができた
- ▶ パラメータ調整確認の時間が短縮できた
 - ・ 既存の方法: 0.5 日/回
 - モデルベース開発: 10 秒/回

困難だった点

- ▶ 制御対象のモデリングの難易度が高かった
 - ・ 設計部との連携が取ればよかった
(CAD → Simulinkの変換機能の活用)

○ MPC導入の良かった点/困難だった点

良かった点

- ▶ 既存制御より高精度な制御が一部でできた
- ▶ パラメータ数を削減できた
 - ・ コントローラ数 既存: PID制御器7つ
 - 本取り組み: MPC1つ
 - ・ 調整項 既存: 各ゲイン、操作タイミング
 - 本取り組み: 設計要件、制約条件

困難だった点

- ▶ 高精度な制御対象モデルがないと高度な制御ができない
 - ・ 現在も制御対象モデルを改善中
- ▶ MPC設定によってはPLCへ実装できない
 - ・ 実装できる最大コード長を超える場合がある

○ まとめ

- ▶ モデルに基づく制御系設計をし、実機レスでの制御開発を進めた
- ▶ 有機膜形成装置についてMPCを用いた制御ができた
- ▶ Simulink PLC Coderにより、MPCを即座にPLCへ実装できた
- ▶ 上記取り組みにより、高度な制御を実装することができた

○ 今後の取り組み

- ▶ モデリング技術の向上
- ▶ 他の装置についてもモデルベース開発の取り組みを横展開
 - 開発期間短縮や性能改善に寄与
 - 当社装置の価値と競争力の向上